

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Jan Salášek



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**ANALOGOVÉ FUNKČNÍ BLOKY FRAKTÁLNÍHO ŘÁDU**

ANALOGUE FRACTIONAL-ORDER FUNCTION BLOCKS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jan Salášek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Jan Salášek

**ID:** 146945

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Analogové funkční bloky fraktálního řádu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku návrhu kmitočtových filtrů fraktálního řádu. Popište přístupy návrhu z pohledu aproximace či přímého využití fraktálního pasivního prvku v obvodové struktuře. Na základě získaných znalostí navrhnete vlastní řešení fraktálních kmitočtových filtrů s vybranými aktivními prvky a vyhodnotíte jejich chování simulacemi ve vhodném software. Na základě získaných výsledků pak nejvhodnější řešení prakticky realizujete a ověříte experimentálním měřením.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SOLTAN, A., RADWAN, A.G., SOLIMAN, A.M. Fractional order filters with two fractional elements of dependant order, Microelectronics Journal, roč. 43, s. 818-827, 2012.

[2] EL-KHAZALI, R. On the biquadratic approximation of fractional-order Laplacian operators, Analog. Integr. Circ. Sig. Process, roč. 82, s. 503-517, 2015.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 25.5.2016

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

**Konzultant diplomové práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem bloků filtru fraktálního řádu pomocí aproximace filtrem vyššího celočíselného řádu. Jsou použity aktivní filtry třetího řádu pro vytvoření filtru řádu  $1 + \alpha$ , kde  $\alpha$  je rovna od nuly do jedné. Jeden z filtrů je prakticky realizován a změřen.

## KLÍČOVÁ SLOVA

analogový filtr, filtr fraktálního řádu, aproximace, univerzální proudový konvektor, univerzální napěťový konvektor

## ABSTRACT

Thesis describes the design of the blocks of fractional-order filters approximation using a filter of higher order integer. Active filters of third-order are use to create filter of  $1 + \alpha$ -order, where  $\alpha$  is between zero to one. One of the filters is practically implemented and measured.

## KEYWORDS

analog filter, fractional-order filter, approximation, universal current conveyor, universal voltage conveyor

SALÁŠEK, Jan *Analogové funkční bloky fraktálního řádu*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 48 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analogové funkční bloky fraktálního řádu“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Aktivní prvky</b>	<b>12</b>
1.1 Operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou . . . . .	12
1.2 Univerzální proudový konvektor . . . . .	12
1.3 Univerzální napěťový konvektor . . . . .	13
<b>2 Fraktální obvody</b>	<b>15</b>
<b>3 Návrh filtru s operačními zesilovači s proudovou zpětnou vazbou</b>	<b>17</b>
3.1 Postup návrhu pro filtr s operačními zesilovači s proudovou zpětnou vazbou a rozdílnými kondenzátory . . . . .	17
3.2 Postup návrhu pro filtr s operačními zesilovači s proudovou zpětnou vazbou a shodnými kondenzátory . . . . .	18
3.3 Příklady filtrů . . . . .	19
<b>4 Struktura s univerzálními proudovými konvektory</b>	<b>22</b>
4.1 Simulace . . . . .	23
<b>5 Struktura s univerzálními napěťovými konvektory a univerzálním proudovým konvektorem</b>	<b>26</b>
5.1 Simulace . . . . .	27
<b>6 Praktická realizace</b>	<b>30</b>
<b>7 Závěr</b>	<b>35</b>
<b>Literatura</b>	<b>36</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>37</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>38</b>
A Seznam součástí	39
B Návrh desky plošných spojů	41
C Originální výsledky měření získané z obvodového analyzátoru	44
D Fotografie desky	47





# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schématická značka operačního zesilovače s proudovou zpětnou vazbou	12
1.2	Schématická značka univerzálního proudového konveju	13
1.3	Schématická značka univerzálního proudového konveju	14
2.1	Příčková struktura	15
3.1	Filtr s operačnímy zesilovači s proudovou zpětnou vazbou	17
3.2	Modulová charakteristika	21
3.3	Odchylka modulové charakteristiky od ideální	21
4.1	Struktura s univerzálními proudovými konvejory	22
4.2	Modulová charakteristika	24
4.3	Fázová charakteristika	24
4.4	Odchylka simulace s reálnými prvky od simulace s ideálními prvky	25
5.1	Struktura s univerzálnímy napěťovými konvejory a univerzálním proudovým konvejorem	26
5.2	Modulová charakteristika	28
5.3	Fázová charakteristika	29
5.4	Odchylka simulace s reálnými prvky od simulace s ideálními prvky	29
6.1	Změřená modulová charakteristika	31
6.2	Změřená fázová charakteristika	31
6.3	Porovnání změřené a simulované modulové charakteristiky pro $\alpha = 0,3$	32
6.4	Porovnání změřené a simulované modulové charakteristiky pro $\alpha = 0,5$	33
6.5	Porovnání změřené a simulované modulové charakteristiky pro $\alpha = 0,7$	34
B.1	Návrh desky plošných spojů shora	41
B.2	Návrh desky plošných spojů zezdola	41
B.3	Návrh desky plošných spojů - osazovací plán	42
B.4	Schéma realizovaného obvodu	43
C.1	Výsledek měření pro $\alpha = 0,3$	44
C.2	Výsledek měření pro $\alpha = 0,5$	45
C.3	Výsledek měření pro $\alpha = 0,7$	46
D.1	Fotografie shora	47
D.2	Fotografie zezdola	47

## SEZNAM TABULEK

3.1	Hodnoty součástek pro různé kondenzátory . . . . .	20
3.2	Hodnoty součástek pro shodné kondenzátory . . . . .	20
4.1	Hodnoty součástek pro strukturu s univerzálními proudovými konvejory	23
5.1	Hodnoty součástek pro strukturu s univerzálními napěťovými konvej- ory a univerzálním proudovým konvejorem . . . . .	28
6.1	Hodnoty součástek pro praktickou realizaci . . . . .	30

# ÚVOD

Tato práce se věnuje návrhu funkčních bloků fraktálního řádu. V práci bude popsán návrh pomocí aproximace aktivním filtrem třetího řádu typu dolní propust. V prvních dvou kapitolách budou uvedeny teoretické základy. Následovat bude postup návrhu hodnot jednotlivých součástí pro strukturu s operačním zesilovačem s proudovou zpětnou vazbou převzatou z [2], ale jiným postupem. Struktury s CFA navržené pomocí obou postupů budou simulovány pomocí programu Orcad a porovnány pro kmitočet 100 kHz a jeden a půl řád filtru. V dalších kapitolách budou navrhnuty další dvě struktury. Bude proveden návrh pro mezní kmitočet 100 kHz a řády filtru 1,3, 1,5 a 1,7. Struktura skládající se z pěti proudových konvektorů bude postavena a změřena.

# 1 AKTIVNÍ PRVKY

Aktivní prvky umožňují vytvářet kmitočtové filtry zajímavých vlastností. V následujících kapitolách budou ukázána zapojení využívající aktivní prvky: operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou (CFA), univerzální proudový konvektor (UCC) a univerzální napěťový konvektor (UVC).

## 1.1 Operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou

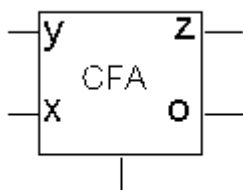
Chování operačního zesilovače s proudovou zpětnou vazbou odpovídá chování proudového konvektoru druhé generace, kde je na bránu Z připojen sledovač napětí a jeho výstup je připojen na bránu O. [4] Vztah mezi branovými proudy a napětími je popsán rovnicemi (1.1), (1.2), (1.3), (1.4).

$$u_X = u_Y \quad (1.1)$$

$$i_Y = i_X \quad (1.2)$$

$$i_Z = i_X \quad (1.3)$$

$$u_O = u_Z \quad (1.4)$$



Obr. 1.1: Schématická značka operačního zesilovače s proudovou zpětnou vazbou

## 1.2 Univerzální proudový konvektor

Univerzální proudový konvektor má tři napěťové vstupní brány Y1, Y2 a Y3 a čtyři výstupní proudové brány Z1+, Z1-, Z2+ a Z2-. Podle [4] je vztah mezi branovými

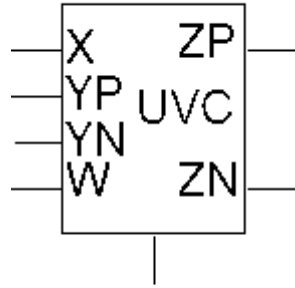
proudy a napětími popsán rovnicemi (1.5), (1.6), (1.7), (1.8).

$$u_X = u_{Y1} - u_{Y2} + u_{Y3} \quad (1.5)$$

$$i_{Y1} = i_{Y2} = i_{Y3} = 0 \quad (1.6)$$

$$i_{Z1+} = i_{Z2+} = i_X \quad (1.7)$$

$$i_{Z1-} = i_{Z2-} = i_{-X} \quad (1.8)$$



Obr. 1.2: Schématická značka univerzálního proudového konveju

### 1.3 Univerzální napěťový konveju

Obecný napěťový konveju byl doplněn o vstupní proudovou bránu YN, výstupní napěťovou bránu ZN a pomocnou napěťovou bránu W. Tím vznikl šestibran nazývaný univerzální napěťový konveju. Podle [4] je vzájemný vztah mezi branovými napětími popsán rovnicemi (1.9), (1.10), (1.11), (1.12) a (1.13). Propojením brány W se volí, jaký napěťový konveju vznikne. Dá se použít i jako další vstup.

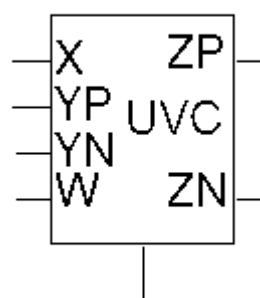
$$i_X = i_{YP} - i_{YN} \quad (1.9)$$

$$u_{YP} = u_W \quad (1.10)$$

$$u_{YN} = u_W \quad (1.11)$$

$$u_{ZP} = u_X \quad (1.12)$$

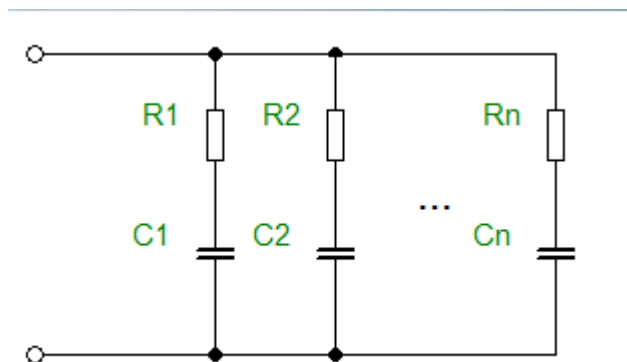
$$u_{ZN} = -u_X \quad (1.13)$$



Obr. 1.3: Schématická značka univerzálního proudového konveju

## 2 FRAKTÁLNÍ OBVODY

Analogové frekvenční filtry jsou obvody, které realizují přenosovou funkci závislou na kmitočtu. Obvody se mohou skládat z odporů, kondenzátorů, cívek a aktivních prvků. Vždy musí být přítomen alespoň jeden kmitočtově závislý prvek. Cívky obvykle nejsou použity kvůli velkým rozměrům a parazitním vlastnostem. Přenosová funkce se dá popsat podílem polynomů. Pokud se k zápisu přenosové funkce použije obraz vytvořený pomocí Laplaceovy transformace, vznikne podíl polynomů. Nejvyšší mocnitel v přenosové funkci určuje řád filtru. Při použití dostupných součástek je možné vytvořit pouze filtr celého řádu. Pro některá použití je vhodnější použít neceločíselný řád. Fraktální obvody jsou elektronické obvody, které realizují filtry neceločíselného řádu. Jsou dvě možnosti. Jedna možnost je aproximovat fraktální součástku pomocí dlouhé řady paralelně spojených sériových RC článků. Druhá možnost je aproximovat přenosovou funkci pomocí filtru vyššího řádu.[2][3]



Obr. 2.1: Příčková struktura

Přenosová funkce filtru typu dolní propust řádu  $1 + \alpha$  je dána vzorcem (2.1).

$$K(s) = \frac{K_1}{s^{1+\alpha} + K_2} \quad (2.1)$$

Ve vzorci (2.1) je dán pro nízké kmitočty přenos  $K_1/K_2$  a podle [3] mezní kmitočet (2.2).

$$\omega_{-3dB} = \left[ K_2 \left( \sqrt{1 + \cos^2 \frac{(1+\alpha)\pi}{2}} - \cos \frac{(1+\alpha)\pi}{2} \right) \right]^{\frac{1}{n+\alpha}} \quad (2.2)$$

Podle [5] lze přenosovou funkci (2.1) aproximovat podle Butterwortha přenosovou funkcí (2.3), kde pro činitele  $K_i$  platí vztahy (2.4), (2.5) a (2.6).

$$K(s) = \frac{K_1}{s^{1+\alpha} + K_3 s^\alpha + K_2} \quad (2.3)$$

$$K_1 = 1 \quad (2.4)$$



$$K_2 = 0,2937\alpha + 0,71216 \quad (2.5)$$

$$K_3 = 1,068\alpha^2 + 0,161\alpha + 0,3324 \quad (2.6)$$

Přenosovou funkci (2.3) lze podle [2] aproximovat přenosovou funkcí (2.7), kde činitele  $a_i$  a  $b_i$  jsou dány vzorci (2.8), (2.9), (2.10), (2.11), (2.12), (2.13) a (2.14).

$$K(s) = \frac{K_1}{a_0} \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (2.7)$$

$$a_0 = 2(1 + \alpha) \quad (2.8)$$

$$a_1 = 5 - \alpha^2 \quad (2.9)$$

$$a_2 = 2(1 - \alpha) \quad (2.10)$$

$$b_0 = \frac{a_0 K_2 + a_K 3}{a_0} \quad (2.11)$$

$$b_1 = \frac{a_1(K_2 + K_3) + a_2}{a_0} \quad (2.12)$$

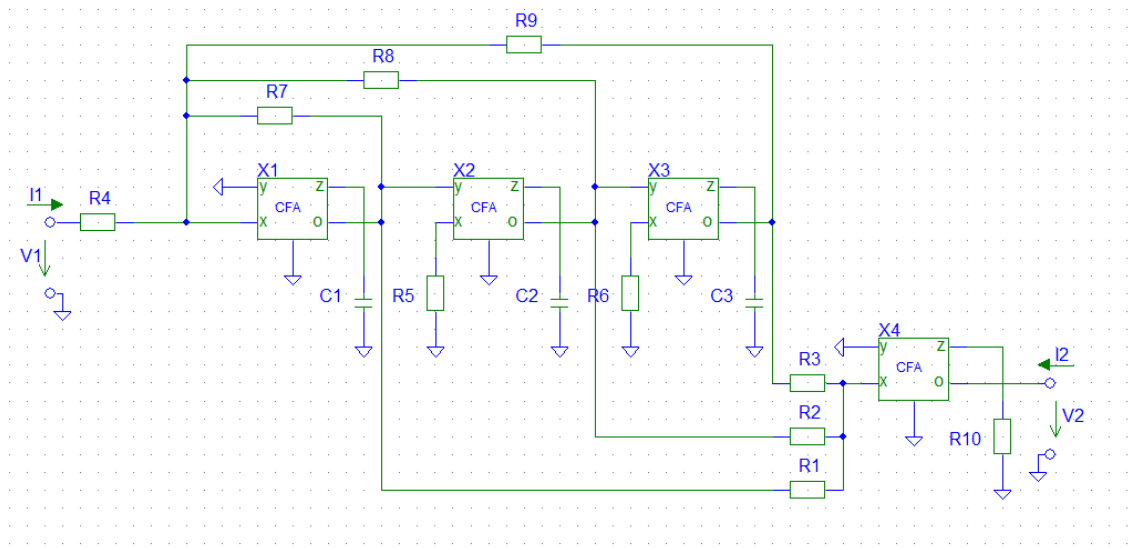
$$b_2 = \frac{a_1 + a_0 K_3 + a_2 K_2}{a_0} \quad (2.13)$$

$$K(s) = \frac{K_1}{a_0} \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (2.14)$$

### 3 NÁVRH FILTRU S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI S PROUDOVOU ZPĚTNOU VAZBOU

#### 3.1 Postup návrhu pro filtr s operačními zesilovači s proudovou zpětnou vazbou a rozdílnými kondenzátory

Tento návrh je převzat z [2].



Obr. 3.1: Filtr s operačními zesilovači s proudovou zpětnou vazbou

Rezistory  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_9$  mají shodnou hodnotu a dále budou značeny  $R$ . Jednotlivé časové konstanty  $\tau_i$  se dají spočítat podle vzorců (3.1), (3.2) a (3.3).

$$\tau_1 = \frac{1}{b_2} \frac{1}{\omega_0} \quad (3.1)$$

$$\tau_2 = \frac{b_2}{b_1} \frac{1}{\omega_0} \quad (3.2)$$

$$\tau_3 = \frac{b_1}{b_0} \frac{1}{\omega_0} \quad (3.3)$$

Váhy  $G_i$  se dají spočítat podle vzorců (3.4), (3.5) a (3.6).

$$G_1 = \frac{K_1 a_2}{a_0 b_2} \quad (3.4)$$

$$G_2 = \frac{K_1 a_1}{a_0 b_1} \quad (3.5)$$

$$G_3 = \frac{K_1}{b_0} \quad (3.6)$$

Po zvolení hodnoty  $R$  lze dopočítat hodnoty  $C$  podle vzorce (3.7).

$$C_i = \frac{\tau_i}{R} \quad (3.7)$$

Nyní je potřeba zvolit hodnotu rezistoru  $R_{10}$ . Hodnoty rezistorů  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  lze spočítat podle vzorce (3.8).

$$R_i = \frac{R_{10}}{G_i} \quad (3.8)$$

### 3.2 Postup návrhu pro filtr s operačními zesilovači s proudovou zpětnou vazbou a shodnými kondenzátory

Protože jsou kondenzátory vyráběny v méně početných řadách hodnot, je vhodnější při návrhu volit hodnoty kondenzátorů a dopočítat hodnoty rezistorů. Je-li vycházeno ze zapojení na obrázku (3.1) a jsou-li zvoleny všechny kondenzátory shodné kapacity, přenosová funkce má tvar (3.9).

$$K(s) = \frac{R_9 R_7 R_{10} R_2 R_1 R_8 + p(R_6 R_9 R_7 R_{10} R_1 R_3 C R_8) + p^2(R_5 R_6 R_9 R_7 R_{10} R_2 R_3 C^2 R_8)}{R_4 R_7 R_2 R_1 R_3 R_8 + p(R_4 R_6 R_9 R_7 R_2 R_1 R_3 C) + p^2(R_4 R_5 R_6 R_9 R_2 R_1 R_3 C^2 R_8) + p^3(R_4 R_5 R_6 R_9 C R_7 R_2 R_1 R_3 C^3 R_8)} \quad (3.9)$$

Po úpravě vzorce (2.14) a dosazení  $s = p/\omega^2$  lze získat vzorec (3.10) a ze vzorce (3.9) lze obdobně získat vzorec (3.11). Mezi vzorci (3.10) a (3.11) lze nalézt formální podobnost.

$$K(p) = \frac{K_1}{b_0} \frac{p^2 \frac{a_2}{\omega_0^2 a_0} + p \frac{a_1}{\omega_0 a_0} + 1}{p^3 \frac{1}{\omega_0^3 b_0} + p^2 \frac{b_2}{\omega_0^2 b_0} + p \frac{a_1}{\omega_0 b_0} + 1} \quad (3.10)$$

$$K(p) = \frac{R_{10} R_9}{R_4 R_3} \frac{p^2 \frac{C^2 R_3 R_5 R_6}{R_1} + p \frac{C R_3 R_6}{R_2} + 1}{p^3 C^3 R_5 R_6 R_9 + p^2 \frac{C^2 R_5 R_6 R_9}{R_7} + p \frac{C R_9 R_6}{R_8} + 1} \quad (3.11)$$

Porovnáním těchto vzorců lze dosáhnout šesti vzorců (3.12), (3.13), (3.14), (3.15), (3.16) a (3.17).

$$\frac{a_2}{\omega_0^2 a_0} = \frac{C^2 R_3 R_5 R_6}{R_1} \quad (3.12)$$

$$\frac{a_1}{\omega_0 a_0} = \frac{C R_3 R_6}{R_2} \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{\omega_0^3 b_0} = C^3 R_5 R_6 R_9 \quad (3.14)$$

$$\frac{b_2}{\omega_0^2 b_0} = \frac{C^2 R_5 R_6 R_9}{R_7} \quad (3.15)$$

$$\frac{b_1}{\omega_0 b_0} = \frac{C R_6 R_9}{R_8} \quad (3.16)$$

$$\frac{K_1}{b_0} = \frac{R_{10} R_9}{R_3 R_4} \quad (3.17)$$

Z těchto vzorců se jeví jako výhodné použít shodné hodnoty pro rezistory  $R_5$ ,  $R_6$  a  $R_9$ . Použití shodných hodnot není nutné, ale je zjednodušující. Dále budu uvažovat shodné hodnoty. Při použití různých hodnot musí být zachován jejich součin. Po zvolení velikosti kondenzátoru je možné vypočítat hodnoty rezistorů  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  a  $R_9$  podle vzorců (3.18), (3.19) a (3.20).

$$R_5 = R_6 = R_9 = \frac{1}{\omega_0 C} \sqrt[3]{\frac{1}{b_0}} \quad (3.18)$$

$$R_7 = \frac{\omega_0^2 C^2 R_5 R_6 R_9}{b_2} \quad (3.19)$$

$$R_8 = \frac{\omega_0 C R_6 R_9}{b_2} \quad (3.20)$$

Nyní je potřeba zvolit hodnotu rezistorů  $R_4$  a  $R_{10}$ . Musí být zvoleny tak, aby vyšly hodnoty rezistorů  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  ve vhodných mezích vzhledem k parazitním vlastnostem výsledného obvodu. Rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  budou vypočteny podle vzorců (3.21), (3.22) a (3.23).

$$R_3 = \frac{b_0 R_9 R_{10}}{K_1 R_4} \quad (3.21)$$

$$R_2 = \frac{\omega_0 a_0 C R_3 R_6}{a_1} \quad (3.22)$$

$$R_1 = \frac{\omega_0^2 a_0 C^2 R_3 R_5 R_6}{a_2} \quad (3.23)$$

### 3.3 Příklady filtrů

Byly vypočteny hodnoty součástek pro variantu s různými a se shodnými kondenzátory. Obě varianty pro mezní kmitočet 100 kHz a tři řády  $1 + \alpha$ . Vypočtené hodnoty jsou v tabulkách 3.1 a 3.2. Hodnoty součástek, které bylo možno volit, byly zvoleny na základě simulace.

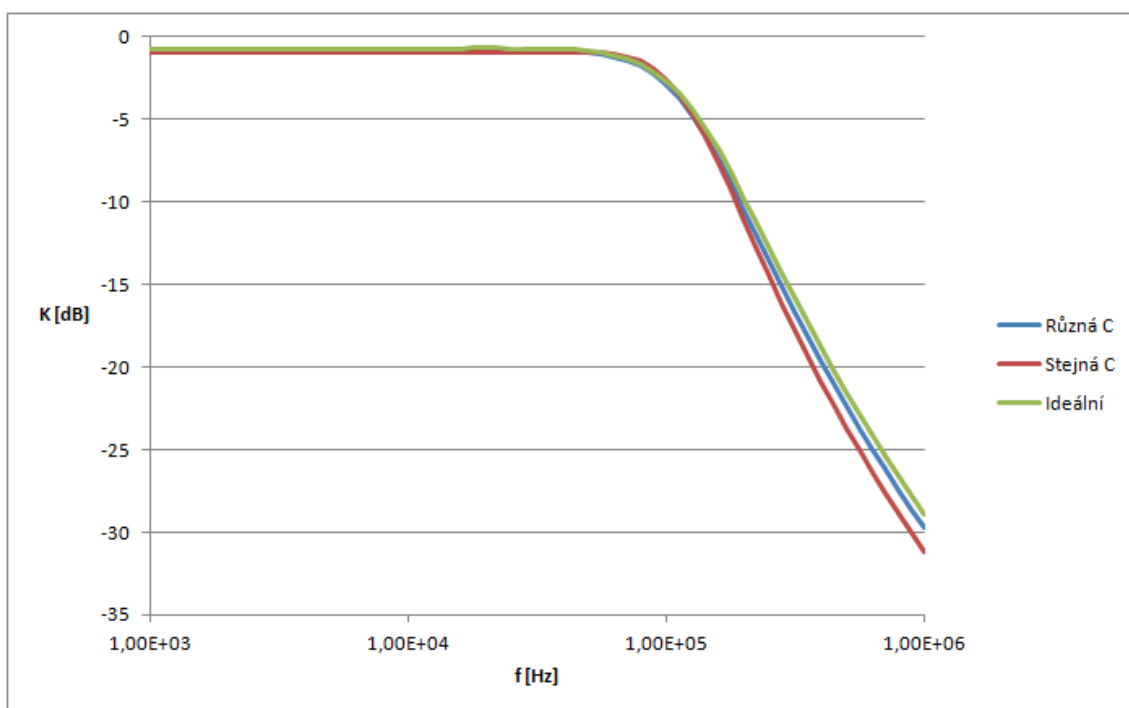
Modulová charakteristika pro filtr jeden a půltého řádu jsou zobrazeny v grafu 3.2. Pro porovnání je v grafu zanesen ideální průběh bez parazitních vlastností součástek. V grafu 3.3 je pro lepší názornost zobrazen rozdíl mezi charakteristikou získanou ze simulace a ideálním průběhem.

Součástka	Hodnota pro $\alpha = 0,3$	Hodnota pro $\alpha = 0,5$	Hodnota pro $\alpha = 0,7$
CFA	AD844	AD844	AD844
R	$5\text{ k}\Omega$	$5\text{ k}\Omega$	$5\text{ k}\Omega$
$C_1$	114 pF	125 pF	130 pF
$C_2$	302 pF	293 pF	292 pF
$C_3$	888 pF	821 pF	783 pF
$R_{10}$	$5\text{ k}\Omega$	$5\text{ k}\Omega$	$5\text{ k}\Omega$
$R_3$	$26\text{ k}\Omega$	$38,2\text{ k}\Omega$	$69,6\text{ k}\Omega$
$R_2$	$7,81\text{ k}\Omega$	$87,5\text{ k}\Omega$	$10,1\text{ k}\Omega$
$R_1$	$5,29\text{ k}\Omega$	$5,42\text{ k}\Omega$	$5,44\text{ k}\Omega$

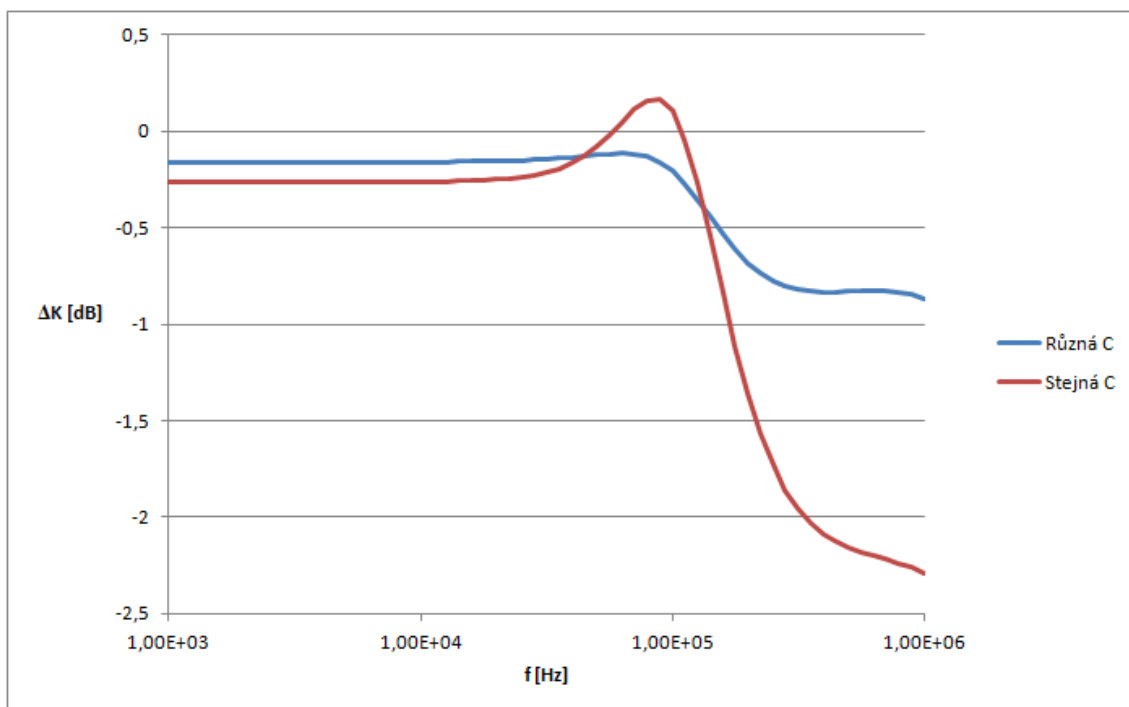
Tab. 3.1: Hodnoty součástek pro různé kondenzátory

Součástka	Hodnota pro $\alpha = 0,3$	Hodnota pro $\alpha = 0,5$	Hodnota pro $\alpha = 0,7$
CFA	AD844	AD844	AD844
$R_{10}$	$6\text{ k}\Omega$	$6\text{ k}\Omega$	$6\text{ k}\Omega$
$R_5, R_6, R_9,$	$15,6\text{ k}\Omega$	$15,5\text{ k}\Omega$	$15,5\text{ k}\Omega$
$R_7$	$5,69\text{ k}\Omega$	$6,24\text{ k}\Omega$	$6,48\text{ k}\Omega$
$R_8$	$5,50\text{ k}\Omega$	$5,91\text{ k}\Omega$	$6,11\text{ k}\Omega$
$R_3$	$49,5\text{ k}\Omega$	$50,4\text{ k}\Omega$	$50,5\text{ k}\Omega$
$R_2$	$25,8\text{ k}\Omega$	$31,0\text{ k}\Omega$	$37,0\text{ k}\Omega$
$R_1$	$88,7\text{ k}\Omega$	$143\text{ k}\Omega$	$27,1\text{ k}\Omega$

Tab. 3.2: Hodnoty součástek pro shodné kondenzátory



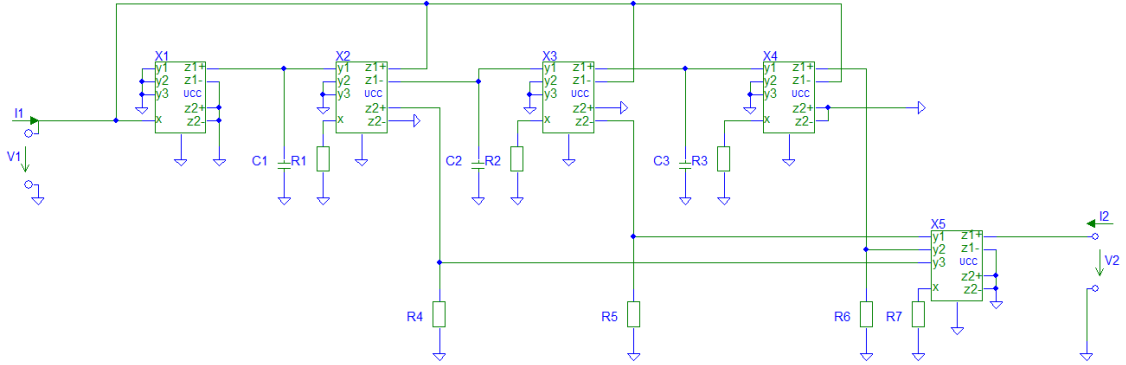
Obr. 3.2: Modulová charakteristika



Obr. 3.3: Odchylka modulové charakteristiky od ideální

## 4 STRUKTURA S UNIVERZÁLNÍMI PROUDOVÝMI KONVEJORY

Struktura s univerzálními proudovými konvejory je na obrázku 4.1. Tato struktura pracuje v proudovém režimu a tvoří filtr typu dolní propust. Její přenosová funkce je dána vzorcem 4.1.



Obr. 4.1: Struktura s univerzálními proudovými konvejory

$$K(s) = \frac{s^2 R_2 R_3 R_4 C_2 C_3 + R_6 + s R_3 R_5 C_3}{s^3 R_1 R_2 R_3 R_7 C_1 C_2 C_3 + s^2 R_2 R_3 R_7 C_2 C_3 + R_7 + s R_3 R_7 C_3} \quad (4.1)$$

Po úpravě vzorce (4.1) a dosazení  $s = p/\omega^2$  lze získat vzorec (4.2)

$$K(p) = \frac{R_6}{R_7} \frac{p^2 \frac{R_2 R_3 R_4 C_2 C_3}{R_6} + p \frac{R_3 R_5 C_3}{R_6} + 1}{p^3 R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 + p^2 R_2 R_3 C_2 C_3 + p R_3 C_3 + 1} \quad (4.2)$$

Mezi vzorci (3.10) a (4.2) lze nalézt formální podobnost a jejich porovnáním lze dosáhnout šesti vzorců (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) a (4.8).

$$\frac{a_2}{\omega_0^2 a_0} = \frac{R_2 R_3 R_4 C_2 C_3}{R_6} \quad (4.3)$$

$$\frac{a_1}{\omega_0 a_0} = \frac{R_3 R_5 C_3}{R_6} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{\omega_0^3 b_0} = R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 \quad (4.5)$$

$$\frac{b_2}{\omega_0^2 b_0} = R_2 R_3 C_2 C_3 \quad (4.6)$$

$$\frac{b_1}{\omega_0 b_0} = R_3 C_3 \quad (4.7)$$

$$\frac{K_1}{b_0} = \frac{R_6}{R_7} \quad (4.8)$$

Z těchto vzorců lze vyjádřit hodnoty jednotlivých součástek. Hodnoty kondenzátorů  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  a rezistoru  $R_4$  budou zvoleny. Hodnoty součástek  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  a  $R_7$  budou vypočteny pomocí vzorců (4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13) a (4.14).

$$R_1 = \frac{1}{C_1 b_2 \omega_0} \quad (4.9)$$

$$R_2 = \frac{b_2}{C_2 b_1 \omega_0} \quad (4.10)$$

$$R_3 = R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 \quad (4.11)$$

$$R_5 = \frac{R_4 a_1 b_2}{a_2 b_1} \quad (4.12)$$

$$R_6 = \frac{b_2 R_4 a_0}{a_2 b_0} \quad (4.13)$$

$$R_7 = \frac{b_2 R_4 a_0}{K_1 a_2} \quad (4.14)$$

## 4.1 Simulace

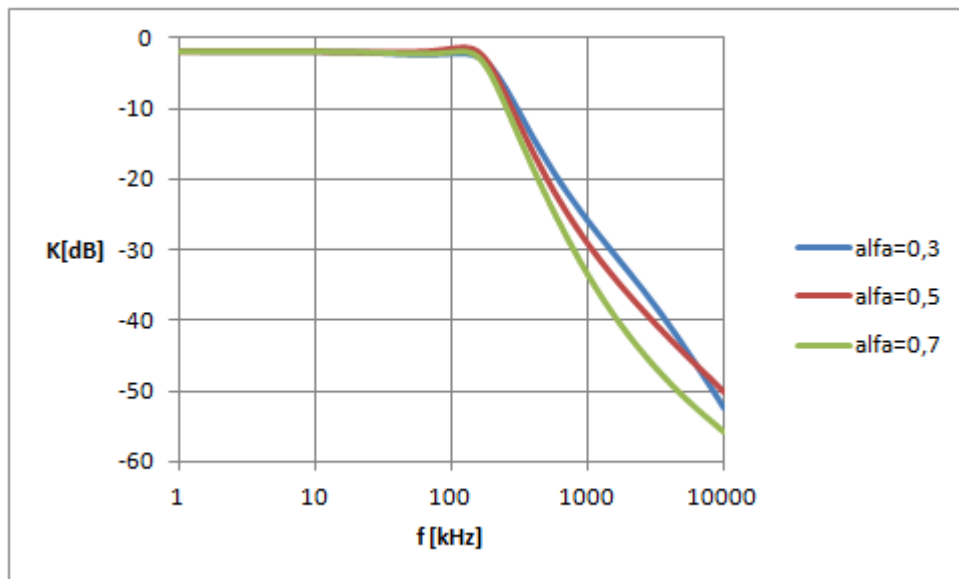
Podle vzorců (4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13) a (4.14) byly vypočítány hodnoty součástek pro simulaci filtru s  $\alpha = 0,3$ ,  $\alpha = 0,5$  a  $\alpha = 0,7$ . Hodnoty všech kondenzátorů byly zvoleny 1 nF. Hodnoty zbylých rezistorů byly určeny na základě simulace tak, aby byl minimální vliv parazitních vlastností. Hodnoty součástek jsou v tabulce 5.1.

Součástka	Hodnota pro $\alpha = 0,3$	Hodnota pro $\alpha = 0,5$	Hodnota pro $\alpha = 0,7$
$R_1$	560 $\Omega$	620 $\Omega$	1,1 k $\Omega$    1,6 k $\Omega$
$R_2$	1,5 k $\Omega$	1,5 k $\Omega$	1,5 k $\Omega$
$R_3$	4,3 k $\Omega$	3,9 k $\Omega$	3,9 k $\Omega$
$R_4$	100 $\Omega$	100 $\Omega$	100 $\Omega$
$R_5$	330 $\Omega$	430 $\Omega$	680 $\Omega$
$R_6$	910 $\Omega$    1 k $\Omega$	680 $\Omega$	1,3 k $\Omega$
$R_7$	1 k $\Omega$    1,1 k $\Omega$	750 $\Omega$	1,3 k $\Omega$

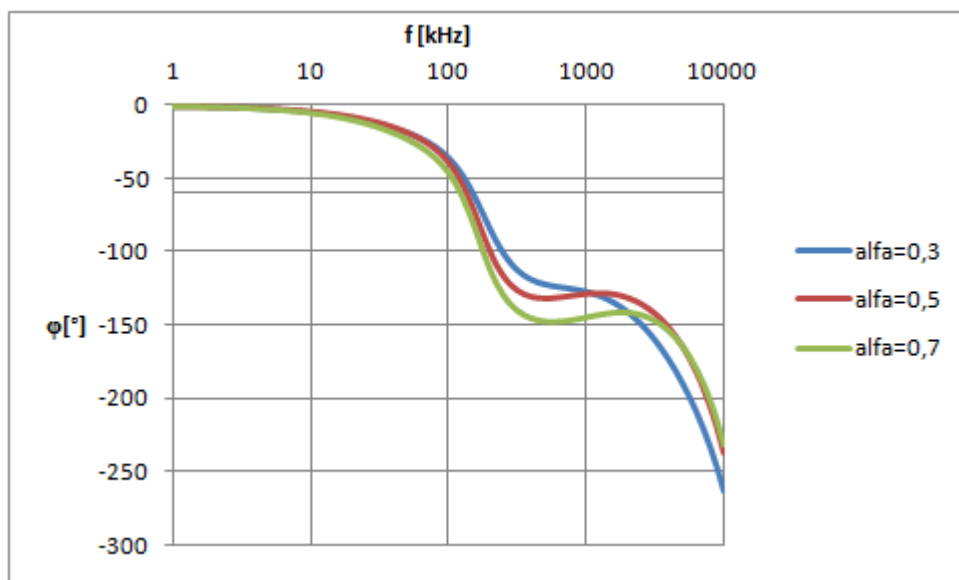
Tab. 4.1: Hodnoty součástek pro strukturu s univerzálními proudovými konvejory

Výsledná modulová charakteristika je v grafu 4.2 a fázová charakteristika v grafu 4.3. Odchylka modelu simulující reálné prvky a modelu simulující ideální prvky je v grafu 4.4. .

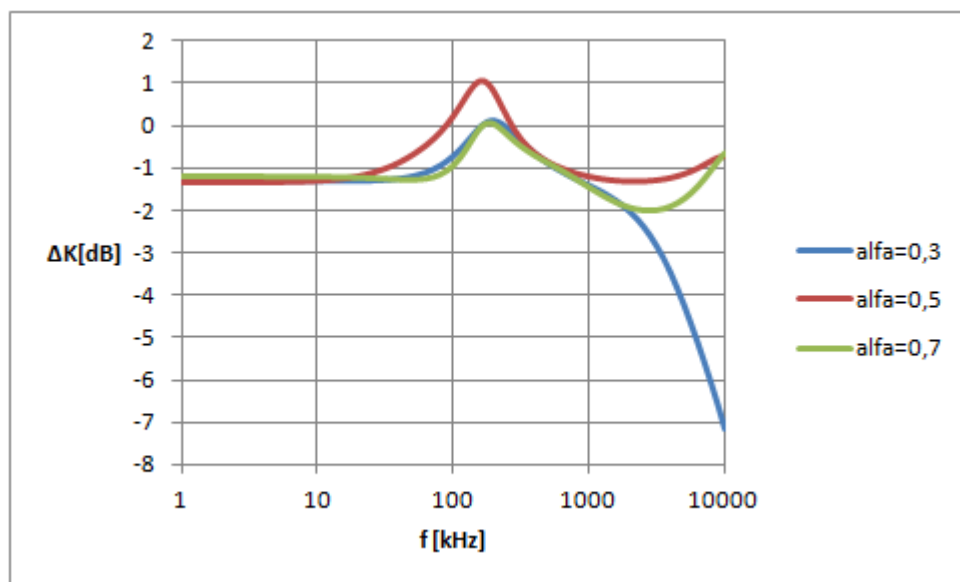




Obr. 4.2: Modulová charakteristika



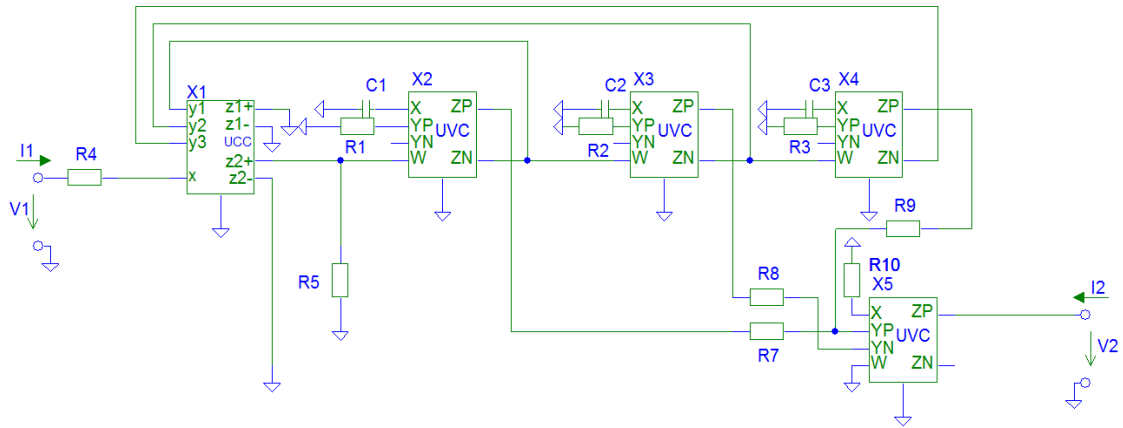
Obr. 4.3: Fázová charakteristika



Obr. 4.4: Odchylka simulace s reálnými prvky od simulace s ideálními prvky

## 5 STRUKTURA S UNIVERZÁLNÍMY NAPĚŤOVÝMI KONVEJORY A UNIVERZÁLNÍM PROUDOVÝM KONVEJOREM

Struktura s univerzálními napěťovými konvejory a univerzálním proudovým konvejorem je na obrázku 5.1. Tato struktura pracuje v napěťovém režimu a tvoří filtr typu dolní propust. Její přenosová funkce je dána vztahem 5.1.



Obr. 5.1: Struktura s univerzálními napěťovými konvejory a univerzálním proudovým konvejorem

$$K(s) = \frac{s^2 R_2 R_3 R_5 R_8 R_9 R_{10} C_2 C_3 + s R_3 R_5 R_7 R_9 R_{10} C_3 + R_5 R_7 R_8 R_{10}}{s^3 R_1 R_2 R_3 R_4 R_7 R_8 R_9 C_1 C_2 C_3 + s^2 R_2 R_3 R_5 R_7 R_8 R_9 C_2 C_3 + s R_3 R_5 R_7 R_8 R_9 C_3 + R_5 R_8 R_7 R_9} \quad (5.1)$$

Po úpravě vzorce (5.1) a dosazení  $s = p/\omega^2$  lze získat vzorec (5.2)

$$K(p) = \frac{R_6}{R_7} \frac{p^2 \frac{R_2 R_3 R_4 C_2 C_3}{R_6} + p \frac{R_3 R_5 C_3}{R_6} + 1}{p^3 R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 + p^2 R_2 R_3 C_2 C_3 + p R_3 C_3 + 1} \quad (5.2)$$

Mezi vzorci (3.10) a (5.2) lze nalézt formální podobnost a jejich porovnáním lze dosáhnout šesti vztahů (5.3), (5.4), (5.5), (5.6), (5.7) a (5.8).

$$\frac{a_2}{\omega_0^2 a_0} = \frac{R_2 R_3 R_9 C_2 C_3}{R_7} \quad (5.3)$$

$$\frac{a_1}{\omega_0 a_0} = \frac{R_3 R_9 C_3}{R_8} \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{\omega_0^3 b_0} = \frac{R_1 R_2 R_3 R_4 C_1 C_2 C_3}{R_5} \quad (5.5)$$

$$\frac{b_2}{\omega_0^2 b_0} = R_2 R_3 C_2 C_3 \quad (5.6)$$

$$\frac{b_1}{\omega_0 b_0} = R_3 C_3 \quad (5.7)$$

$$\frac{K_1}{b_0} = \frac{R_{10}}{R_9} \quad (5.8)$$

Z těchto vzorců lze vyjádřit hodnoty jednotlivých součástek. Hodnoty kondenzátorů  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  a rezistoru  $R_1$  a  $R_4$  budou zvoleny. Hodnoty součástek  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_5$ , a  $R_7$  budou vypočteny pomocí vzorců (5.9), (5.10), (5.11), (5.12), (5.13) a (5.14).

$$R_2 = \frac{b_2}{C_2 b_1 \omega_0} \quad (5.9)$$

$$R_3 = \frac{b_1}{C_3 b_0 \omega_0} \quad (5.10)$$

$$R_5 = R_1 R_4 C_1 b_2 \omega_0 \quad (5.11)$$

$$R_7 = \frac{b_2 R_{10} a_0}{K_1 a_2} \quad (5.12)$$

$$R_8 = \frac{R_{10} b_1 a_0}{K_1 a_1} \quad (5.13)$$

$$R_9 = \frac{R_{10} b_0}{K_1} \quad (5.14)$$

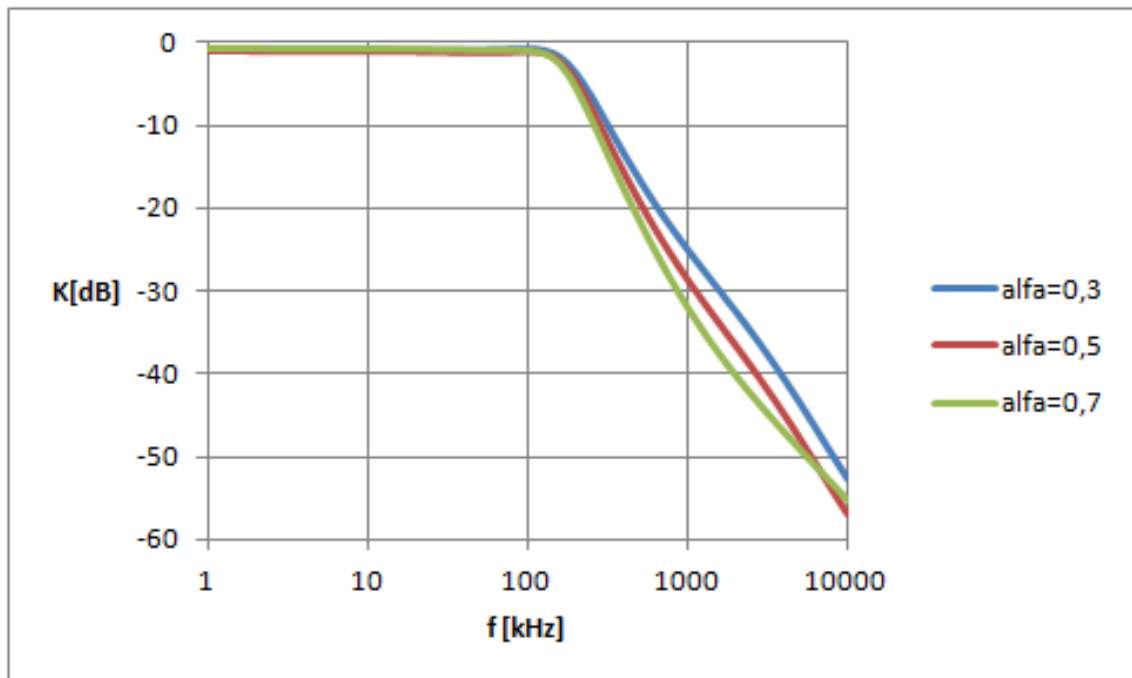
## 5.1 Simulace

Podle vzorců (5.9), (5.10), (5.11), (5.12), (5.13) a (5.14) byly vypočítány hodnoty součástek pro simulaci filtru s  $\alpha = 0,3$ ,  $\alpha = 0,5$  a  $\alpha = 0,7$ . Hodnoty všech kondenzátorů byly zvoleny 1 nF. Hodnoty zbylých rezistorů byly určeny na základě simulace tak, aby byl minimální vliv parazitních vlastností. Hodnoty součástek jsou v tabulce 5.1.

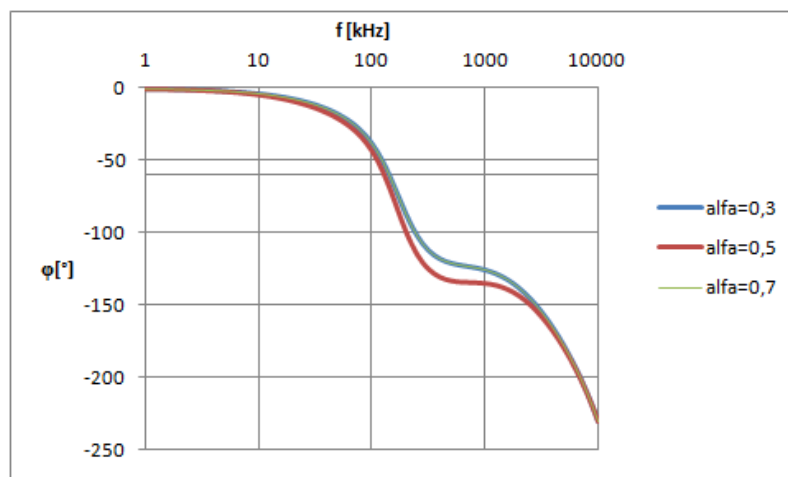
Výsledná modulová charakteristika je v grafu 5.2 a fázová charakteristika v grafu 5.3. Odchylka modelu simulující reálné prvky a modelu simulující ideální prvky je v grafu 5.4. V tomto grafu se křivky pro  $\alpha = 0,3$  a  $\alpha = 0,5$  překrývají.

Součástka	Hodnota pro $\alpha = 0,3$	Hodnota pro $\alpha = 0,5$	Hodnota pro $\alpha = 0,7$
$R_1$	$1\text{ k}\Omega$	$1\text{ k}\Omega$	$1\text{ k}\Omega$
$R_2$	$1,5\text{ k}\Omega$	$1,5\text{ k}\Omega$	$1,5\text{ k}\Omega$
$R_3$	$4,4\text{ k}\Omega$	$4,1\text{ k}\Omega$	$3,9\text{ k}\Omega$
$R_4$	$220\text{ }\Omega$	$220\text{ }\Omega$	$220\text{ }\Omega$
$R_5$	$387\text{ }\Omega$	$352\text{ }\Omega$	$339\text{ }\Omega$
$R_7$	$5,19\text{ k}\Omega$	$7,65\text{ k}\Omega$	$14\text{ k}\Omega$
$R_8$	$1,56\text{ k}\Omega$	$1,75\text{ k}\Omega$	$2\text{ k}\Omega$
$R_9$	$1,06\text{ k}\Omega$	$1,09\text{ k}\Omega$	$1,1\text{ k}\Omega$
$R_{10}$	$1\text{ k}\Omega$	$1\text{ k}\Omega$	$1\text{ k}\Omega$

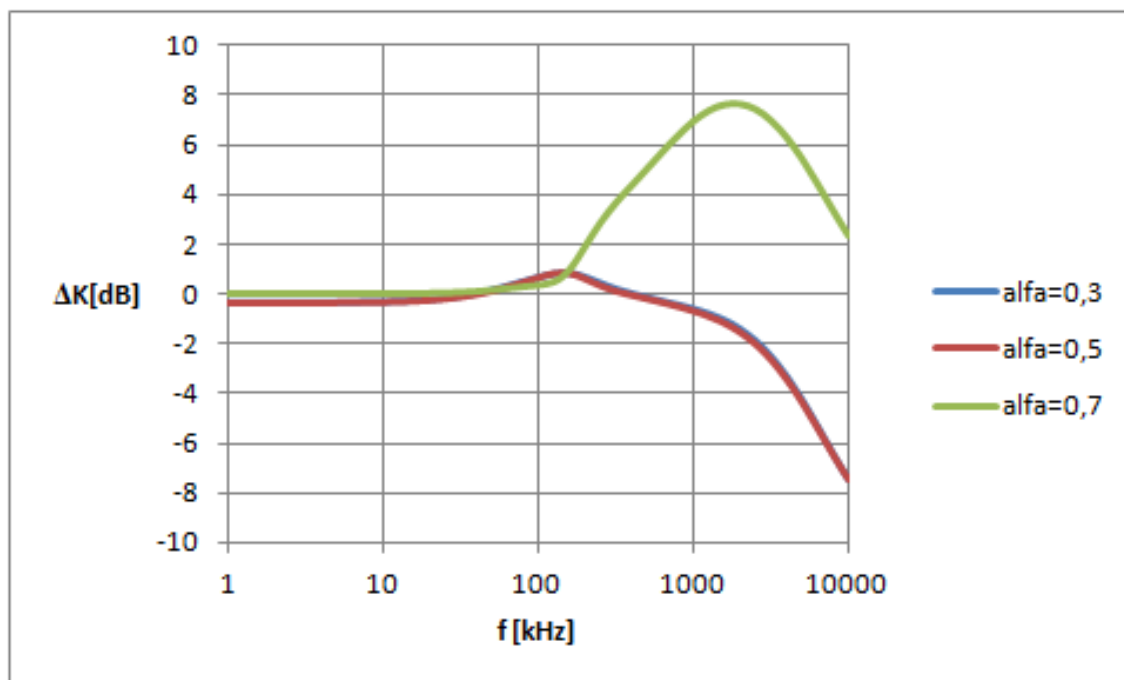
Tab. 5.1: Hodnoty součástek pro strukturu s univerzálními napětovými konvejory a univerzálním proudovým konvejorem



Obr. 5.2: Modulová charakteristika



Obr. 5.3: Fázová charakteristika



Obr. 5.4: Odchylka simulace s reálnými prvky od simulace s ideálními prvky

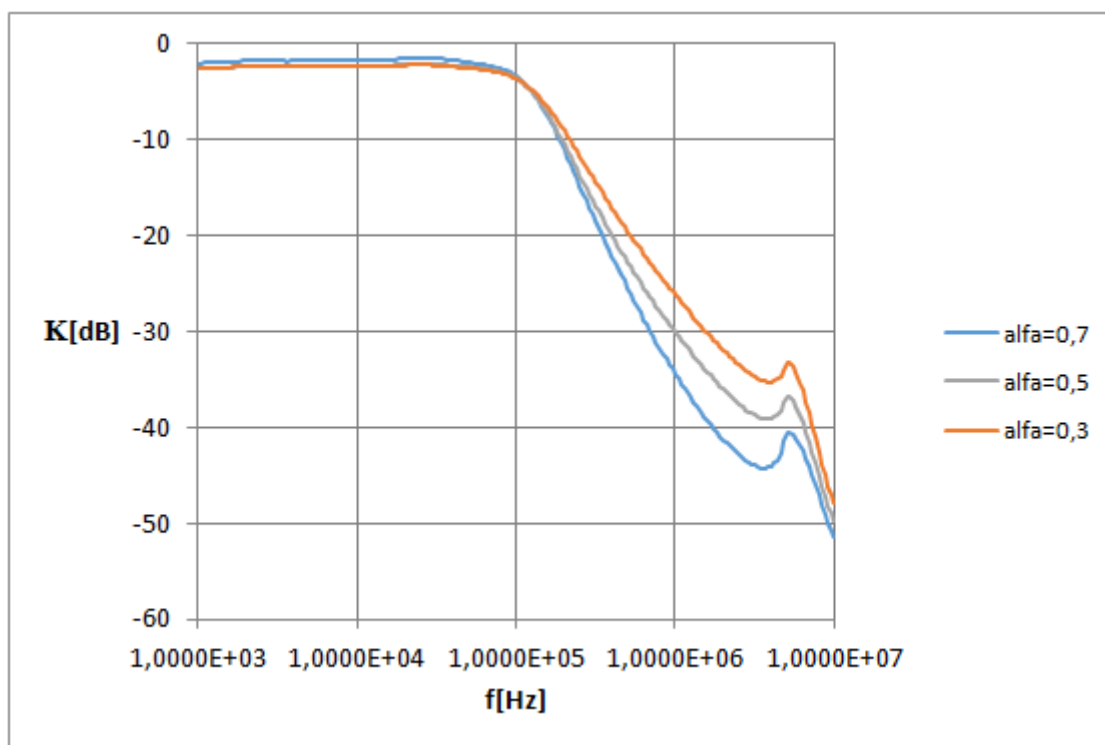
## 6 PRAKTICKÁ REALIZACE

Pro praktickou realizaci byla zvolena struktura s univerzálními proudovými konvejory. Tato struktura vykazovala při simulaci v programu Orcad s modelem napodobujícím reálné prvky malou chybu. Realizovány byly postupně filtry typu dolní propust řádů 1, 3, 1, 5 a 1, 7. Pro všechny tři filtry byla použita jedna deska plošného spoje, na které byly pouze měněny rezistory  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  a  $R_7$ . Kondenzátory  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$  měly vždy hodnotu 1nF. Filtrační kondenzátory byly voleny dle katalogového listu. Jako aktivní prvky byly použity proudové konvejory v podobě integrovaného obvodu UCCX-0349\_SMD. Každý integrovaný obvod obsahuje jeden univerzální proudový konvektor a jeden proudový konvektor druhé generace. Protože realizovaná struktura umožňuje zjednodušit dva univerzální proudové konvejory na proudové konvejory druhé generace, stačí použít tři integrované obvody UCCX-0349\_SMD. Schéma realizovaného obvodu je na obrázku B.4 v příloze. Vstup nevyužitého proudového konvektoru byl ošetřen rezistorem. Všechny rezistory a kondenzátory byly použity typu SMD velikosti 1206. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.1. Pokud nebyl dostupný vhodný rezistor, byly použity dva rezistory zapojené paralelně.

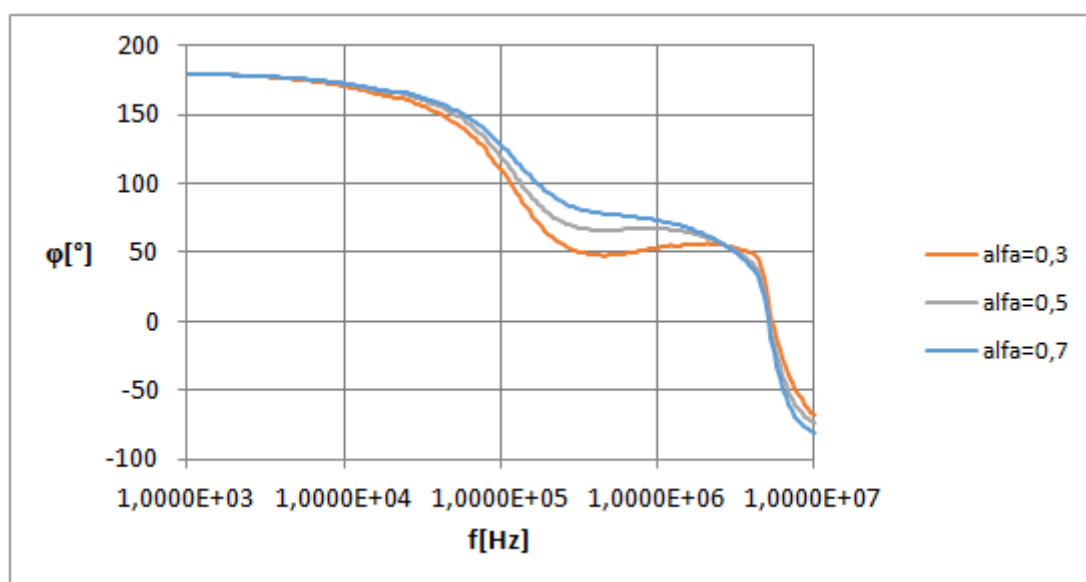
Součástka	Hodnota pro $\alpha = 0,3$	Hodnota pro $\alpha = 0,5$	Hodnota pro $\alpha = 0,7$
$R_1$	560 $\Omega$	620 $\Omega$	1,1 k $\Omega$    1,6 k $\Omega$
$R_2$	1,5 k $\Omega$	1,5 k $\Omega$	1,5 k $\Omega$
$R_3$	4,3 k $\Omega$	3,9 k $\Omega$	3,9 k $\Omega$
$R_4$	100 $\Omega$	100 $\Omega$	100 $\Omega$
$R_5$	330 $\Omega$	430 $\Omega$	680 $\Omega$
$R_6$	910 $\Omega$    1 k $\Omega$	680 $\Omega$	1,3 k $\Omega$
$R_7$	1 k $\Omega$    1,1 k $\Omega$	750 $\Omega$	1,3 k $\Omega$

Tab. 6.1: Hodnoty součástek pro praktickou realizaci

K měření byl použit obvodový analyzátor Agilent 4395A. Analyzátor má výstup i vstup pracující v napěťovém režimu. Měřený obvod má vstup i výstup v proudovém režimu. Na výstup analyzátoru byl připojen převodník napětí - proud a na vstup převodník proud - napětí. Originální výsledky měření tak, jak je zobrazil obvodový analyzátor, jsou na obrázcích C.1, C.2 a C.3. Modulová charakteristika je zobrazena v grafu 6.1. V grafu je vidět podobné zakřivení pro všechny měřené hodnoty. Prudký nárůst modulu ve vysokých kmitočtech nevadí. V této části charakteristiky již filtr nevykazuje podobnost s ideálním filtrem fraktálního řádu, a tedy tato část není zajímavá. V grafu 6.2 je zobrazena fázová charakteristika.



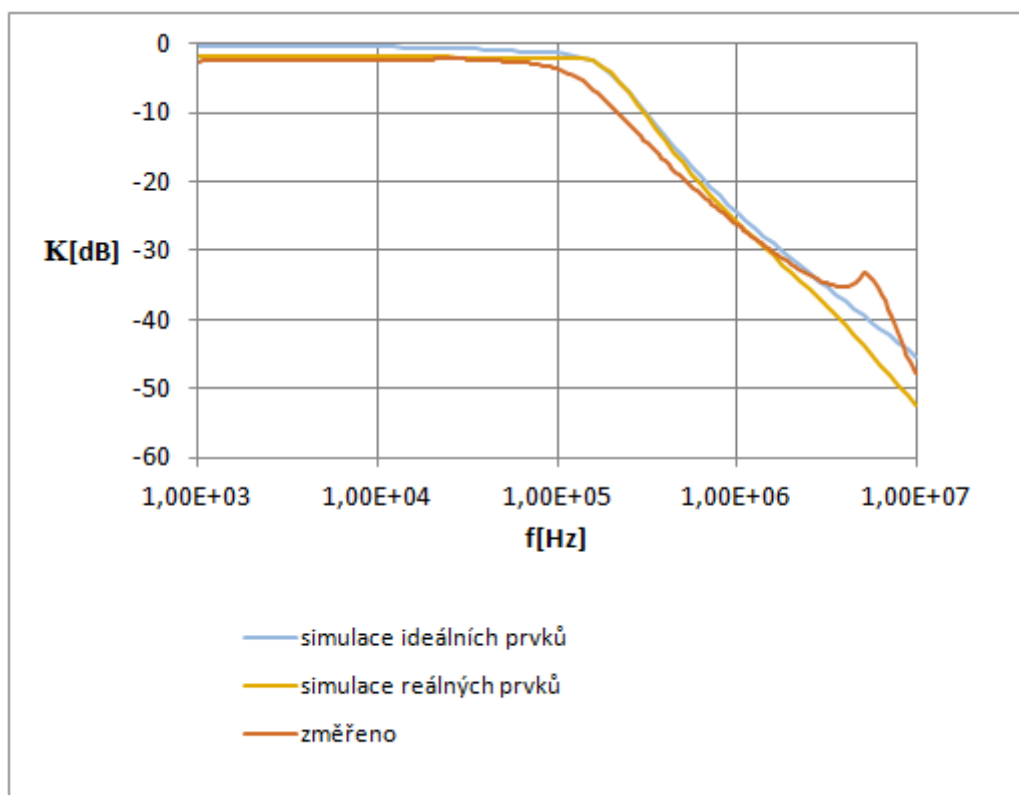
Obr. 6.1: Změřená modulová charakteristika



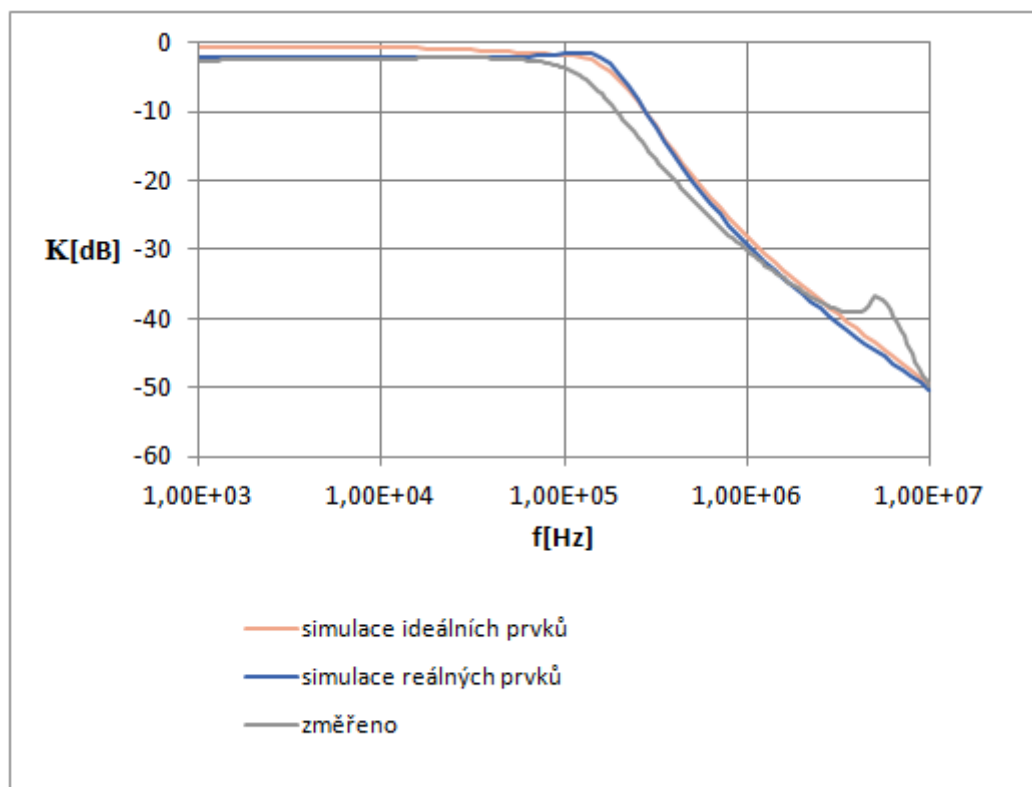
Obr. 6.2: Změřená fázová charakteristika



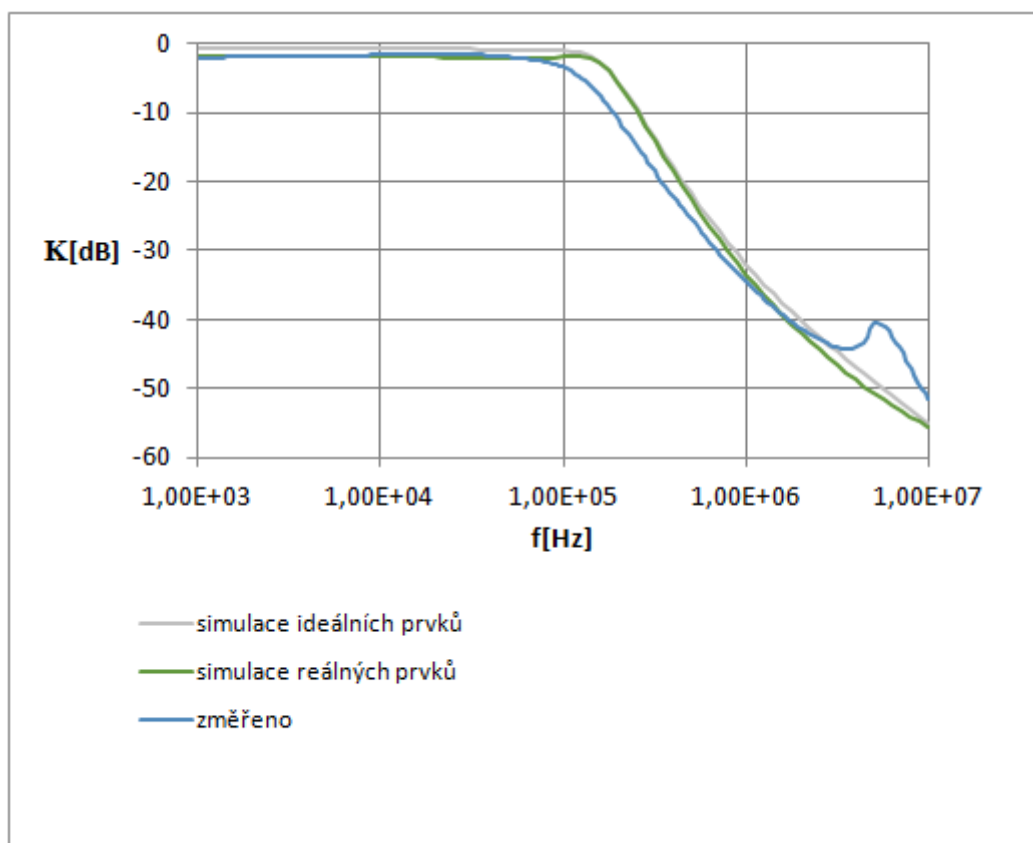
Porovnání výsledku měření s ideálním průběhem a s průběhem simulace z kapitoly 4 je v grafech 6.3, 6.4 a 6.3.



Obr. 6.3: Porovnání změřené a simulované modulové charakteristiky pro  $\alpha = 0,3$



Obr. 6.4: Porovnání změřené a simulované modulové charakteristiky pro  $\alpha = 0,5$



Obr. 6.5: Porovnání změřené a simulované modulové charakteristiky pro  $\alpha = 0,7$

## 7 ZÁVĚR

Práce se zabývala strukturami filtrů třetího řádu aproximující filtry fraktálního řádu typu dolní propust. Vždy při návrhu konkrétních hodnot bylo počítáno s mezním kmitočtem 100 kHz. Pro strukturu převzatou z [2] se mnou navržený postup jeví jako horší. Sice usnadňuje výběr kondenzátorů, volí se na začátku a všechny stejné, ale v simulaci se více projevíly parazitní vlastnosti CFA. Porovnání je vidět v grafu 3.2. Struktura složená z univerzálních proudových konvektorů, pracující v proudovém režimu, vykazuje dobré vlastnosti. V simulaci má menší odchylku od idealizovaného modelu než struktura s UVC a UCC. Toto je vidět v grafech 4.4 a 5.4. Pro praktickou realizaci byla zvolena struktura s univerzálními proudovými konvektory. Prakticky realizovaný filtr je vidět na fotografiích D.1 a D.1. Byl navržen pro mezní kmitočet 100 kHz a pro řády 1,3, 1,5 a 1,7. Měření bylo provedeno na jedné DPS. Mezi měřeními byly vyměněny potřebné rezistory. Modulové a fázové charakteristiky jsou vidět v grafech 6.1 a 6.2. Bohužel je vidět velký rozdíl v okolí mezního kmitočtu mezi změřenou charakteristikou a charakteristikou získanou simulací. Naměřený prudký nárůst modulu ve vysokých kmitočtech nevadí. Charakteristika reálného filtru se blíží charakteristice fraktálního filtru pouze okolo mezního kmitočtu. Ve vysokých kmitočtech použitá aproximace už neplatí, a proto je tato oblast nezajímavá.

## LITERATURA

- [1] SUCHÁNEK T. *Kmitočtový filtr*. Brno: VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav Telekomunikací, 2009. 44s. Vedoucí práce Ing. Ladislav Káňa
- [2] PSYCHALINOS, Costas. *Design of Fractional-Order Filters Using CFOAs: Research Notes*. Patras, 2014.
- [3] MAUNDY, B., A. S. ELWAKIL a T. J. FREEBORN. *On the practical realization of higher-order filters with fractional stepping*. 2010.
- [4] KOTON, Jaroslav. Aplikace proudových a napěťových konvektorů v nefilteračních obvodech. Brno, 2012. Habilitační práce.
- [5] T. Freeborn, B. Maundy, A. Elwakil, *Field programmable analogue array implementation of fractional step filters* 2010.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

C	kondenzátor
CFA	operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou
DPS	deska plošných spojů
f	kmitočet
K	přenos filtru
p	Laplaceův operátor
pF	pikofarad
R	rezistor
s	normovaný Laplaceův operátor
SMD	součástka pro povrchovou montáž
UCC	univerzální proudový konvektor
UVC	univerzální napěťový konvektor
$\omega_0$	mezní kmitočet

# SEZNAM PŘÍLOH

A	Seznam součástek	39
B	Návrh desky plošných spojů	41
C	Originální výsledky měření získané z obvodového analyzátoru	44
D	Fotografie desky	47
E	Obsah přiloženého CD	48

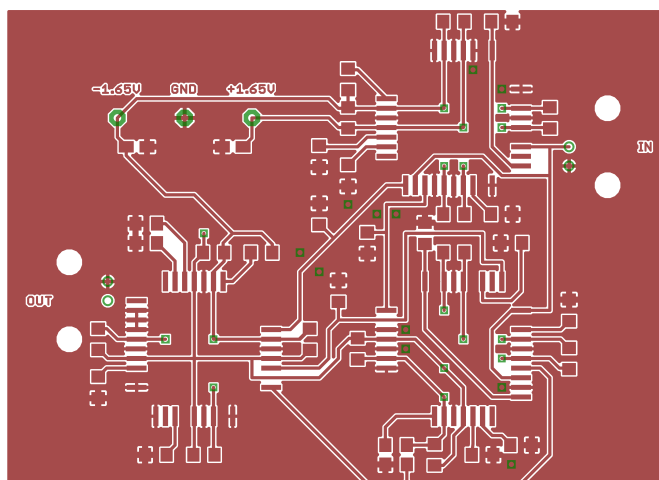
# A SEZNAM SOUČÁSTEK

Součástka	Hodnota	Pouzdro
C1	1nF	C1206
C2	1nF	C1206
C3	1nF	C1206
C4	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	A/3216-18R
C5	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	A/3216-18R
C6	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C7	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C8	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C9	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C10	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C11	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C12	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C13	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C14	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C15	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C16	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
C17	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	C1206
IC1	UCCX-0349_SMD	PLCCSM44
IC2	UCCX-0349_SMD	PLCCSM44
IC3	UCCX-0349_SMD	PLCCSM44
R1	560 $\Omega$ nebo 620 $\Omega$ nebo 1,1 k $\Omega$    1,6 k $\Omega$	R1206
R2	1,5 k $\Omega$ nebo 1,5 k $\Omega$ nebo 1,5 k $\Omega$	R1206
R3	4,3 k $\Omega$ nebo 3,9 k $\Omega$ nebo 3,9 k $\Omega$	R1206
R4	100 $\Omega$	R1206
R5	330 $\Omega$ nebo 430 $\Omega$ nebo 680 $\Omega$	R1206
R6	910 $\Omega$    1 k $\Omega$ nebo 680 $\Omega$ nebo 1,3 k $\Omega$	R1206
R7	1 k $\Omega$    1,1 k $\Omega$ nebo 750 $\Omega$ nebo 1,3 k $\Omega$	R1206
R8	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R9	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R10	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R11	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R12	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R13	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R14	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R15	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206
R16	dle katalogového listu UCCX-0349_SMD	R1206

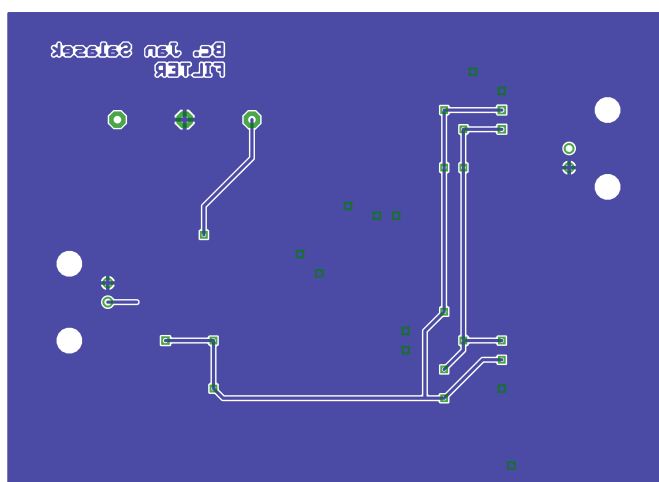


R17	1 $k\Omega$	R1206
X1	BNC konektor	
X2	BNC konektor	

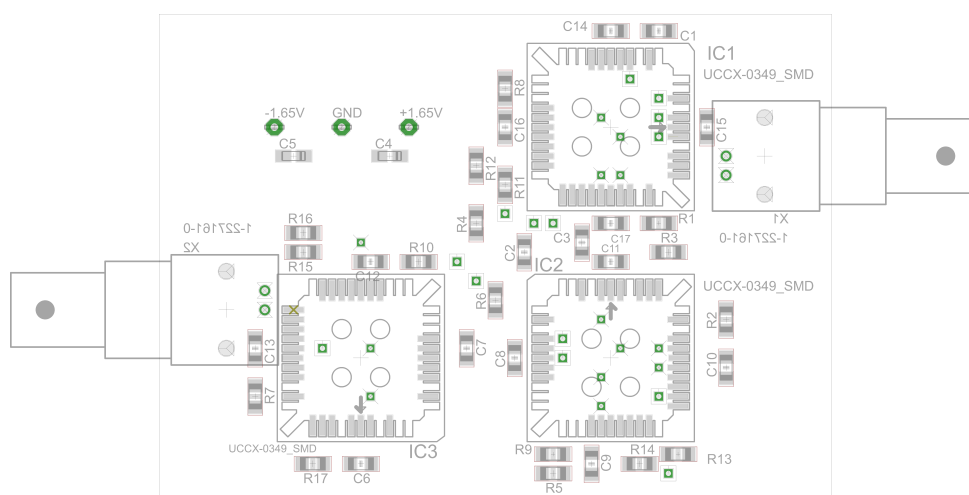
## B NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



Obr. B.1: Návrh desky plošných spojů shora



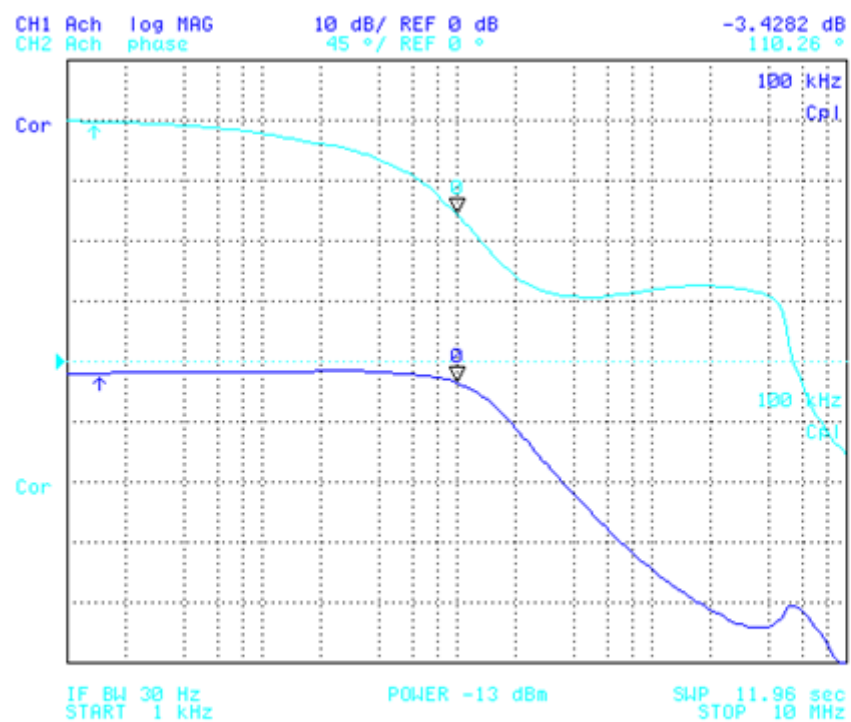
Obr. B.2: Návrh desky plošných spojů zezdola



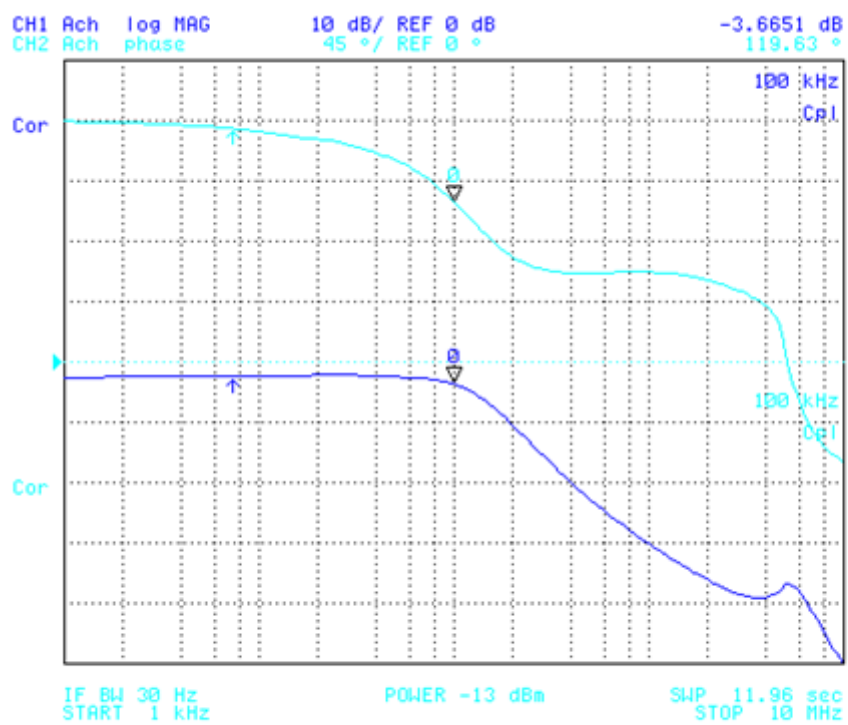
Obr. B.3: Návrh desky plošných spojů - osazovací plán



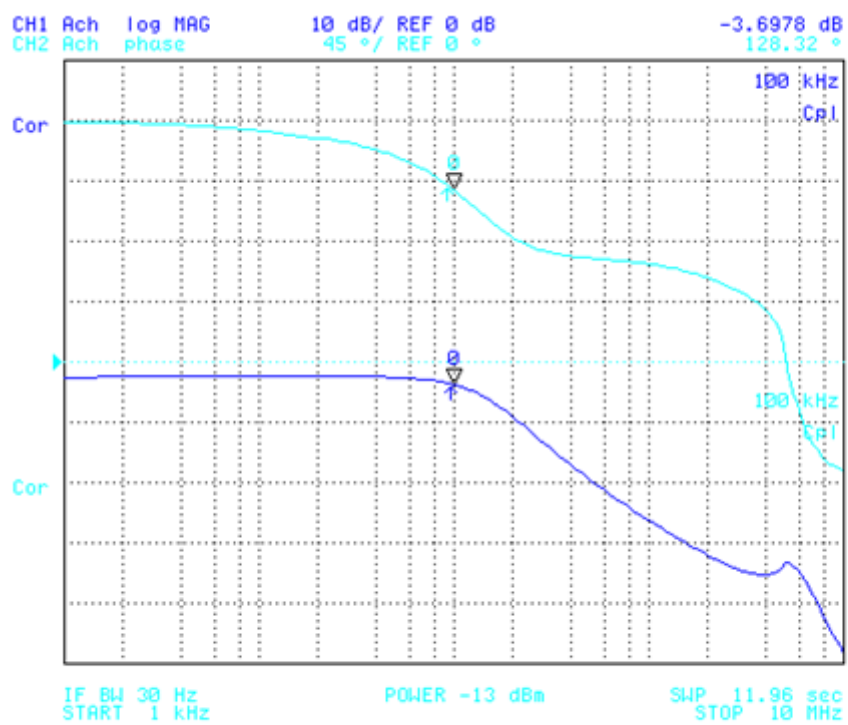
## C ORIGINÁLNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZÍSKANÉ Z OBVODOVÉHO ANALYZÁTORU



Obr. C.1: Výsledek měření pro  $\alpha = 0,3$

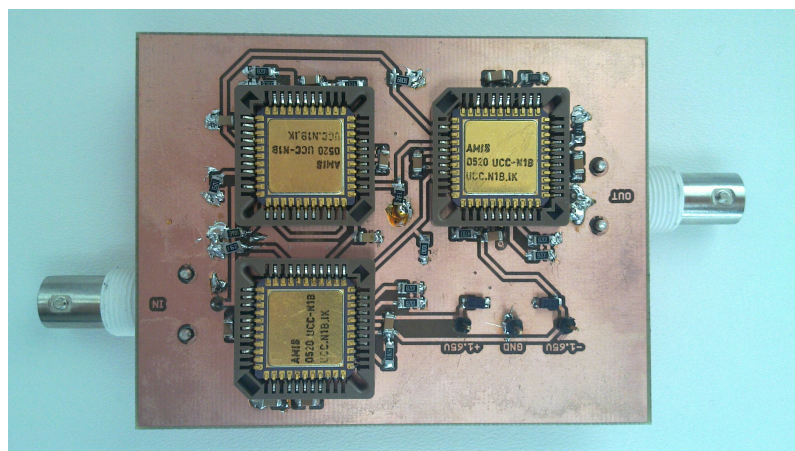


Obr. C.2: Výsledek měření pro  $\alpha = 0,5$

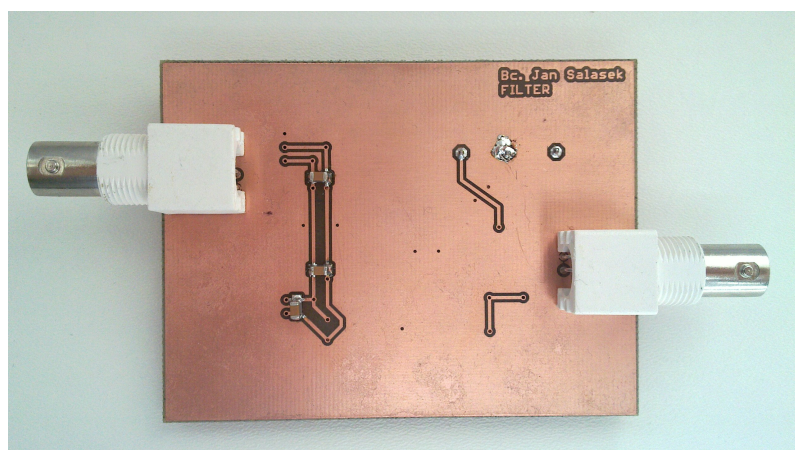


Obr. C.3: Výsledek měření pro  $\alpha = 0,7$

## D FOTOGRAFIE DESKY



Obr. D.1: Fotografie shora



Obr. D.2: Fotografie zezdola



## **E OBSAH PŘILOŽENÉHO CD**

- Elektronická verze tohoto dokumentu
- Schéma vytvořené v programu Eagle 6.4.0
- Návrh DPS vytvořený v programu Eagle 6.4.0